

山 学 大 学 紀 要 (工 学) 第 12 卷 第 2 号 昭 和 48 年 1 月
Bull. of Yamagata Univ. Eng., Vol. 12 No.2 Jan. 1973

圧電共振子を用いたメカニカルフィルタの試作

日 下 部 千 春*・近 野 正**

*教育学部 電気研究室

**工 学 部 電気工学科

1. ま え が き

材料科学の進歩にともない、従来のものにくらべてより高安定、高Qおよび変換能率の大きい圧電セラミックが開発されている。従来、圧電セラミック振動子は特性上の制限から、一部のセラミックフィルタとしての利用を除いては、ほとんど音片、音さなど高Qな機械振動子に接着された変換器としての利用が多く、単体の圧電セラミック共振子をメカニカルフィルタの共振子として用いる試みはほとんどなされていない。しかしながら、優れた圧電セラミックの開発は、メカニカルフィルタ共振子としての利用を可能にし、同時に工程の簡単化や小型化を可能にする。

通常、圧電セラミック振動子は分極および印加電界の方向に応じて、横効果や縦効果の振動を行なうが、電極を分割して電圧の印加方法を工夫すれば、長さ方向の横振動（たわみ振動）を励起することができる。

本文は最近開発された矩形板状圧電セラミックの電極を分割して、横振動の圧電共振子を構成し、これら共振子をねじり結合子あるいは横振動結合子で結合したメカニカルフィルタの試作結果についてのべたものである。分割電極圧電共振子をメカニカルフィルタに用いた場合、出力側共振子の電気端子の入れ換えにより、容易に有極形および無極形の構成が可能となる。

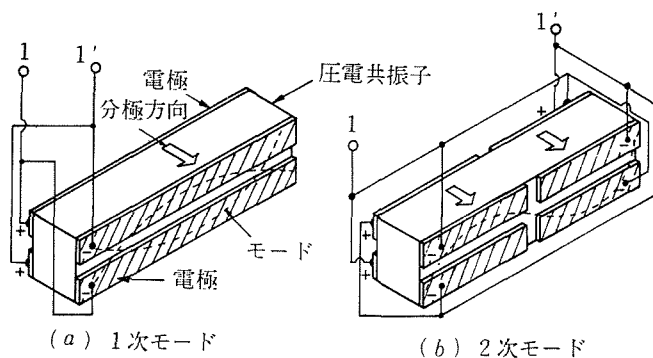
本文でははじめに、圧電セラミックの電極分割による横振動共振子の構成と、有極形および無極形の構成についてのべ、つづいて圧電共振子を用いたメカニカルフィルタの構成と試作結果についてのべている。均一な特性の共振子が得られなかったため、挿入損などの点で改良の余地があるが、構成の容易さや小形化など利点も多く、今後の実用化が期待できる。

2. 横振動共振子の構成とメカニカルフィルタの等価回路

第1図(a), (b)は圧電共振子の構成を示す。* 矩形状圧電セラミック板の電極を2分割あるいは4分割して、その電極を図示のように接続し、端子1 1'間に交流電圧を印加する。*

第1図(a)の場合、圧電セラミックの上半分が伸びるとき、他方が縮むから、全体として第1次の横振動を行ない、(b)図の場合も同様にして第2次の横振動が励振される。⁽¹⁾

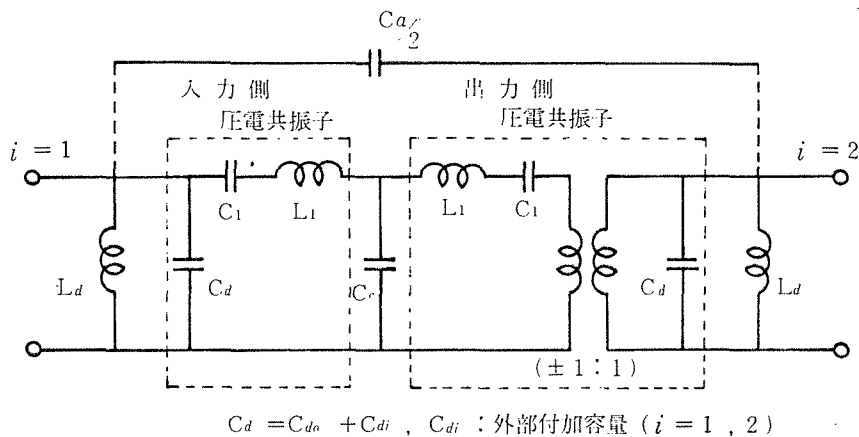
*共振子寸法は第3章に記載。



第1図 (a), (b)横振動圧電共振子の構成

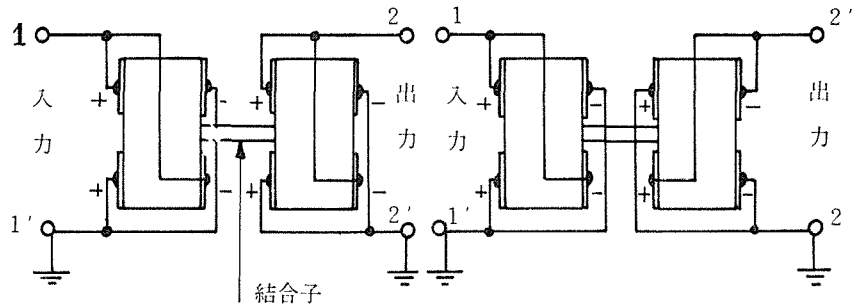
したがって、これら共振子をねじり振動細棒、横振動細棒あるいは縦振動細棒で結合すれば、音片フィルタと同様、いろいろな結合様式のメカニカルフィルタが構成される。

第2図は結合子をもつメカニカルフィルタの一般的等価回路で、 L_d は外部付加の同調インダクタンス、 $C_d = C_{d0} + C_{di}$ で、 C_{d0} 、 C_{di} はそれぞれ制動容量および外部付加容量、 C_a は減衰極生成のための外部付加容量、 C_e は結合子の等価容量である。



第2図 メカニカルフィルタの等価回路

($\pm 1:1$) の理想変成比は出力側共振子の端子 1 1' の入れ換えにより得られ、理想変成比の極性と端子の接続は第3図(a), (b)のようになる。



(a) $(-1:1)$ 構成

(b) $(+1:1)$ 構成

第3図 (a), (b) 変成比 $(\pm 1:1)$ の構成

いま、第2図の回路で、上下のしゃ断角周波数を ω_{c2} , ω_{c1} とし、半区間回路の短絡インピーダンスを Z_s , 開放インピーダンスを Z_f とすると、

変成比 $(-1:1)$ の場合

$$\left. \begin{aligned} Z_s &= \frac{j\omega(\omega_s^2 - \omega^2)}{C_a'(\omega^2 - \omega_1^2)(\omega^2 - \omega_{c2}^2)} \\ Z_f &= \frac{j\omega(\omega_1^2 - \omega^2)}{C_d(\omega^2 - \omega_{c1}^2)(\omega^2 - \omega_2^2)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$(+1:1)$ の場合

$$\left. \begin{aligned} Z_s &= \frac{j\omega(\omega_1^2 - \omega^2)}{C_a'(\omega^2 - \omega_{c1}^2)(\omega^2 - \omega_2^2)} \\ Z_f &= \frac{j\omega(\omega_s^2 - \omega^2)}{C_d(\omega^2 - \omega_1^2)(\omega^2 - \omega_{c2}^2)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

となり、ここに

$$\left. \begin{aligned} C_a' &= C_d + C_a \\ \omega_1^2 &= \frac{1}{L_1 C_1}, \quad \omega_2^2 = \omega_1^2 \left(1 + \frac{2C_1}{C_c} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

であるから、 $Z_s = Z_f$ より減衰極角周波数 $\omega_{\infty 1}$, $\omega_{\infty 2}$ を求めれば $(-1:1)$ の場合

$$\left\{ \omega_{\infty 1} \right\}^2 = \left\{ \frac{(1 + C_1/C_c)}{L_1 C_1} \right\} \mp \frac{\sqrt{1 + 2C_c/C_a}}{L_1 C_c} \quad (4)$$

$(+1:1)$ の場合

$$\left\{ \omega_{\infty 1} \right\}^2 = \left\{ \frac{(1 + C_1/C_c)}{L_1 C_1} \right\} \mp \frac{\sqrt{1 - 2C_c/C_a}}{L_1 C_c} \quad (5)$$

となり、 $C_a < C_c$ の範囲では $(-1:1)$ の場合有極形、 $(+1:1)$ の場合無極形となるが、一般に $C_a \ll C_c$ であるから、特別の場合を除いては $(-1:1)$ の構成が有極形となる。

なお,

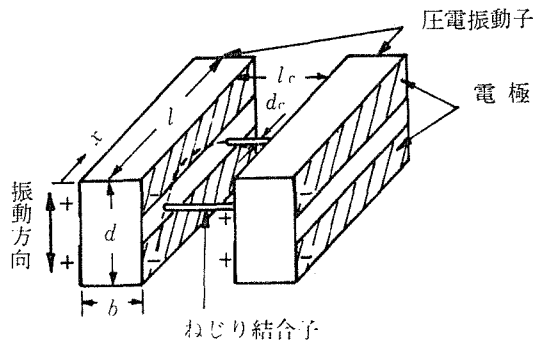
$$\frac{2}{C_a} = \left| C_e L_l^2 (\omega^2 - \omega_1^2)(\omega^2 - \omega_2^2) \right| \quad (6)$$

の関係があるから、 $\omega \equiv \omega_\infty$ を与えれば付加する C_a が決まる。式(6)より付加容量 C_a の減少は減衰極角周波数をしゃ断角周波数から遠ざけ、逆に C_a の増大は近づけることになる。

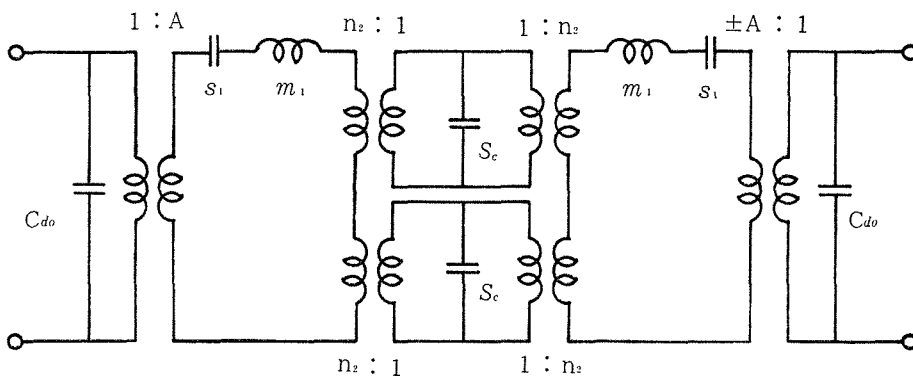
3. ねじり結合子形メカニカルフィルタの構成⁽²⁾

第4図にフィルタの構成を示す。横振動共振子の1次モードの節点に2本のねじり振動結合子を連結したもので、両端の共振子は変換器を兼ねる。

いま、共振子の等価質量を m_1 、等価スチフネスを s_1 、ねじり結合子の静的スチフネスを S_e と表すと、その等価回路は第5図のように表わされる。ここで A は力係数、 n_2 は変



第4図 ねじり結合子形メカニカルフィルタ（共振子の1次モード利用）



第5図 等 価 回 路

成比で、共振子の長さを l 、長軸方向の座標を x と表わし、さらに共振子の第1次標準関数を $\bar{\epsilon}_{1(x)}$ 、 $X = x/l$ とすると

$$\left. \begin{aligned} n_2 &= \frac{\Xi'_{1(X_e)}}{l \Xi'_{1(X_1)}}, & \Xi'_{1(X)} &= \frac{\partial \Xi_{1(X)}}{\partial X} \\ \Xi_{1(X_1=0)} &= 2, & \Xi'_{1(X_e=0.224)} &= -7.889 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

のように与えられる。ここで X_1 は駆動点位置あるいは自由端 ($X_1=0, 1$)、 X_e は結合子の接着位置を表す。

共振子および結合子の等価素子は、共振子の幅を b 、厚さを d 、共振角周波数を ω_1 、結合子の長さを l_e 、直径を d_e と表すと、それぞれ

$$\left. \begin{aligned} m_1 &= \frac{M}{\Xi_{1(X_1)}^2}, & M &= \rho l b d, \\ s_1 &= \omega_1^2 m_1, & \omega_1 &= \frac{\alpha_1^2 d}{l^2 \sqrt{12}} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \\ S_e &= \frac{\pi G_e d_e^4}{32 l_e} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

と表わされる。ここに α_1 は共振子の第1次固有値 ($\alpha_1 = 4.730$)、 E はヤング率、 ρ は密度で、 G_e は結合子材料の剛性率である。

いま、中心角周波数を ω_0 とし、制動容量 C_{d0} を同調インダクタンス L_d を付加して ω_0 近傍で省略すると、比帯域幅 B は

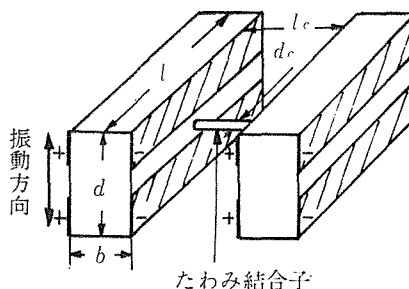
$$B = \frac{\omega_{c2} - \omega_{c1}}{\omega_0} \approx \frac{\omega_{c2} - \omega_{c1}}{\omega_1} = 2 n_2^2 \frac{S_e}{s_1} \quad (9)$$

となるから、共振周波数と B を与えれば式(9)、式(8)より結合子寸法が決定される。

4. 横振動結合子形メカニカルフィルタ

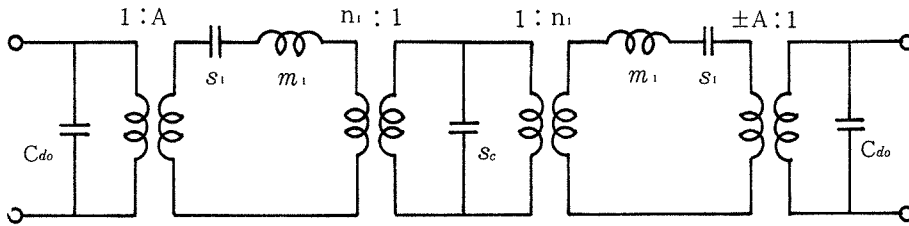
4・1 結合子が両端滑動の横振動結合を行う場合

フィルタの構成を第6図に示す。結合子は共振子の第1次横振動の腹の位置に接着され、たわみ振動により両端の共振子を結合する。結合子は両端滑動の横振動(たわみ振動)を行うから、結合子の静的なたわみスチフネスを s_e 、変成化を n_1 と表わすと、その等価回路は第7図のように示すことができる。



第6図 横振動(たわみ)結合子形メカニカルフィルタ

(結合子が両端滑動の振動を行なう場合；共振子の1次モード利用)



第7図 等価回路

ここに

$$\left. \begin{aligned} s_c &= \frac{3\pi E d_c^4}{16 I_c^3}, & n_1 &= \frac{\Xi_{1(X_c)}}{\Xi_{1(X_1)}}, \\ \frac{\Xi_{1(X_c=0.5)}}{\Xi_{1(X_1=0)}} &= \frac{-1.216}{2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

で s_1 , m_1 はねじり結合子形の場合と同じである。

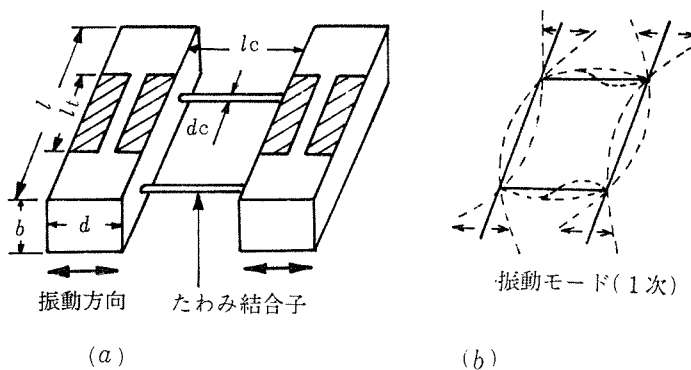
前同様、 C_{do} を同調インダクタンス L_d を付加して省略し、比帯域幅 B を求めると

$$B \doteq \frac{\omega_{c2} - \omega_{c1}}{\omega_1} = \frac{n_1^2 s_c}{s_1} \quad (11)$$

となるから、共振周波数と B を与えれば式 (11) および式 (10) より付加する結合子の寸法が決る。

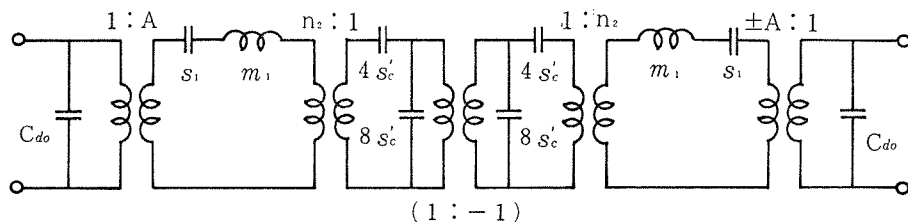
4・2 結合子が両端支持の横振動結合を行う場合⁽³⁾

第8図(a), (b)にフィルタの構成と振動モードを示す。



第8図 (a), (b) 横振動(たわみ)結合子形メカニカルフィルタ (a) と振動モード (b). (結合子が両端支持の振動を行なう場合)

共振子の1次モードの節線に2本の結合子が接着されているため、結合子は曲げモーメントによるたわみ振動によって両端の共振子を結合する。結合子の振動は両端支持棒の支持点に曲げモーメントを印加した場合とみなされるから、⁽⁴⁾ フィルタの等価回路は第9図



第9図 等価回路

のように与えられる。ここで、変成比 n_2 はねじり結合子形の場合と同様で、結合子のスチフネスとして静的たわみスチフネス s'_c を用いると

$$s'_c = \frac{\pi E_c d_c^4}{64 l_c} \quad (12)$$

と与えられる。いま、第9図の回路の入出力端に、同調インダクタンス L_d を付加した ($+A:1$) の場合について、上下のしゃ断角周波数を ω_{c2} , ω_{c1} , 中心角周波数を $\omega_0 = \sqrt{\omega_{c1} \omega_{c2}}$ とし、半区開回路の短路および開放インピーダンスをそれぞれ Z_s , Z_f として、 $Z_s=0$, $Z_f=0$ の角周波数を ω_s , ω_f と表わすと

$$\left. \begin{aligned} \omega_s^2 &= \frac{s_1 + 12n_2^2 s'_c}{m_1}, \\ \omega_f^2 &= \frac{s_1 + 4n_2^2 s'_c}{m_1}, \quad \omega_s > \omega_f \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

となるから

$$\left. \begin{aligned} \omega_{c1} &= \frac{\omega_f \omega_d}{\omega_s}, \quad \omega_{c2} = \frac{\omega_s \omega_d}{\omega_f}, \quad \omega_d = \frac{1}{\sqrt{L_d C_d}}, \quad C_d = C_{do} + C_{di}, \\ \omega_0^2 &= \omega_s^2 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

の関係から、比帯域幅 B は $B = (\omega_s/\omega_f - \omega_f/\omega_s)$ と与えられ、さらに $(\omega_s^2 + \omega_f^2)/2 = \omega_s \omega_f = \omega_0^2$ と近似すると

$$B = \frac{8n_2^2 s'_c}{s_1 + 8n_2^2 s'_c} \quad (15)$$

となる。なお結合子の等価スチフネス $4n_2^2 s'_c$ も考慮した共振子の共振角周波数 ω_f と B との間には

$$\omega_f^2 = \omega_0^2 \left(1 - \frac{B}{2}\right) \quad (16)$$

の関係があるから、 ω_0 と B を与えれば共振子の寸法が決まり、式(15)および式(12)より結合子の寸法が決まる。

5. 試作結果

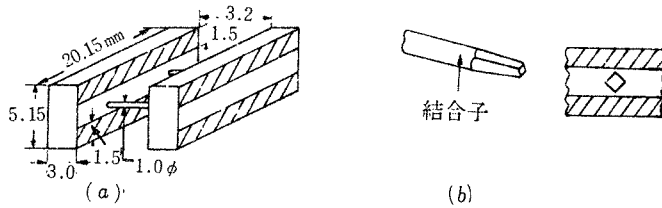
以下、試作したメカニカルフィルタの実験結果を、ねじり結合子形および横振動結合子

形の二つに大別してのべる。

5・1 ねじり結合子形の場合

第10図(a), (b)に試作したフィルタの寸法と結合子の取り付け方法を示す。結合子は同図(b)に示すように鋼鉄線の先端を角形に削り、共振子の節点を超音波加工機で四角の穴をあけ、エポキシ系接着剤で接着している。

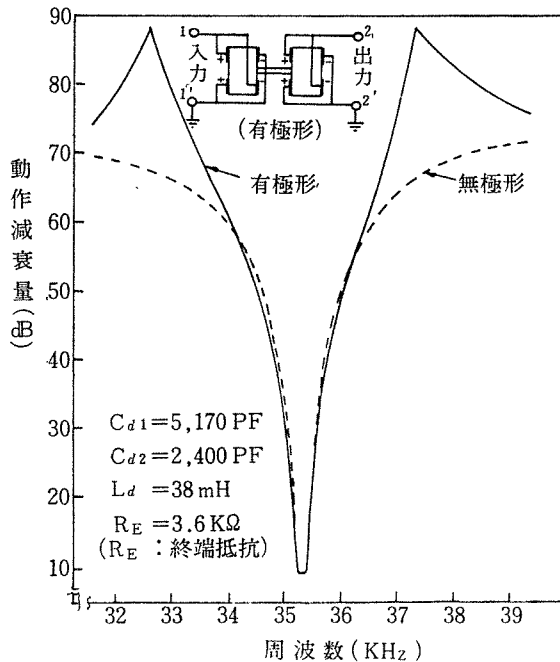
圧電セラミックはジルコン・チタン酸鉛磁器で、また電極の一部分を硝酸で溶解し分割した。



第10図 (a), (b) ねじり結合子形メカニカルフィルタの寸法 (a) と結合子の取り付け (b)

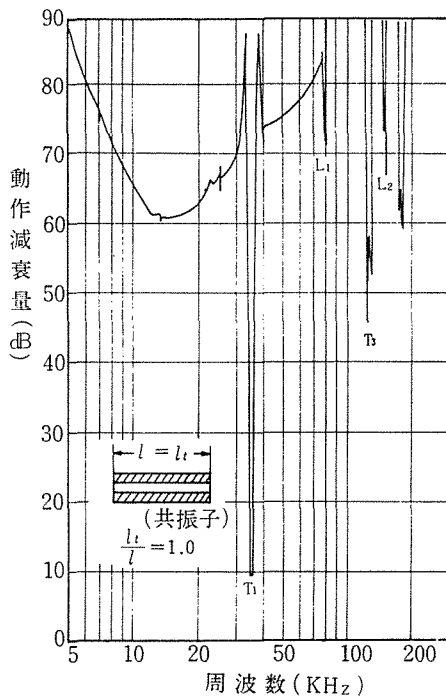
第11図は全面電極（銀電極の長さが共振子の長さと同じこと）の場合のフィルタ特性で、有極形および無極形の特性は、出力側端子 2' の入れ換えによって得られたものである。

第11図の有極形の場合、 $C_a=0$ でも減衰極が生成したが、これは電極間の浮遊容量にもとづくものと考えられる。

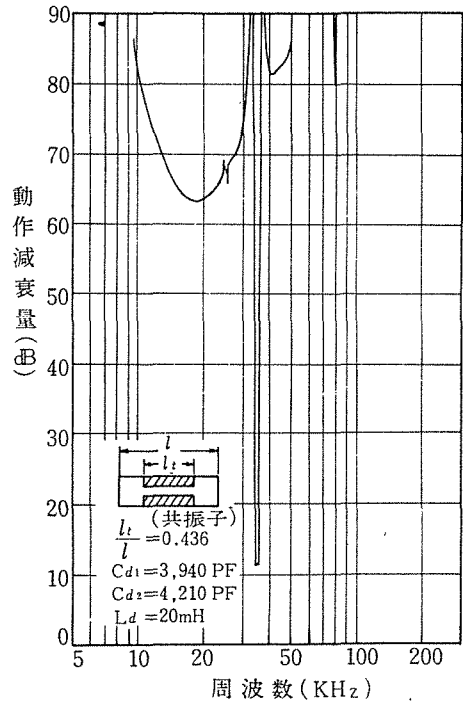


第11図 周波数特性（ねじり結合子形；全面電極）

第12図は全面電極・有極形の広帯域周波数特性で、共振子固有の振動 (L_1 , L_2) や横振動3次モード (T_3) に起因するスプリアスが検出された。第13図は共振子の両端から少量づつ銀電極を取り除き、部分電極 ($l_t/l = 0.436$) とした場合の特性で、全面電極 ($l_t/l = 1.0$) の場合のスプリアスは十分に抑圧されている。なお、横振動3次モード抑圧の長さ比 l_t/l の値が、圧電セラミック接着・音片振動子の場合の l_t/l の値 (0.55) と異なるのは、⁽⁵⁾ 共振子形状による特異性と結合子接着による共振モードの変化に起因すると考えられる。



第12図 広帯域にわたる周波数特性
(ねじり結合子形；全面電極)



第13図 広帯域にわたる周波数特性
(ねじり結合子形；部分電極)

第1表 共振子の等価諸定数値

	共振子 (入力側)	共振子 (出力側)
R (Ω)	430.1	449.4
Q	1251.5	898.5
C_1 (pF)	8.4376	11.248
L_1 (H)	2.444	1.8341
C_{d0}	468	508
A (e.s.u)	4.702×10^5	5.377×10^5
f_1 (kHz)	35.042	35.040

R：等価抵抗

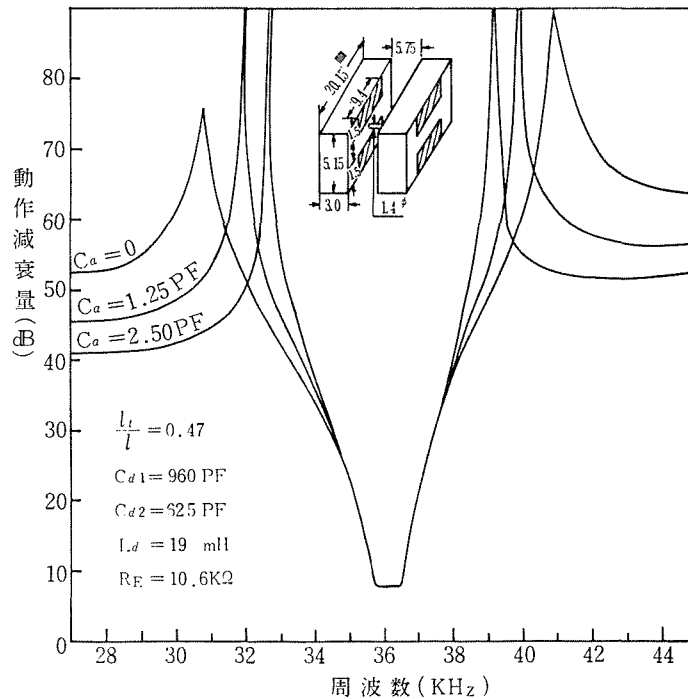
第1表は自由アドミタンス円から算出した等価定数値で、2つの共振子の定数値は一致していない。

この種の振動子では、一般に、振動子自体の力係数やQの値を同一に作ることがむずかしく、また、電極分割のさいの電極面積の不ぞろいが、定数値不一値の原因の一つであるため、均一な特性の振動子を用いることがフィルタ特性向上の目安となる。

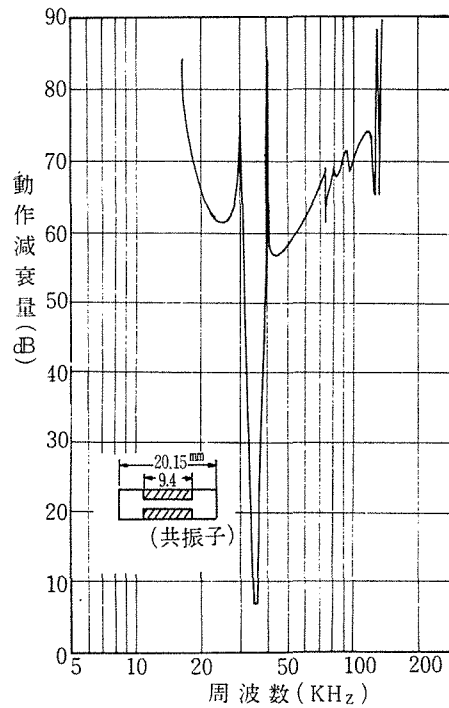
5・2 横振動結合子形の場合

第14図および第15図は4・1節の構成の有極形特性で、第16図は第14図の構成を、結合子長をかえて広帯域化した場合である。第17図は4・2節の構成の有極形特性で、有極形の接続図も同図に示してある。両構成とも部分電極のため高い周波数領域でのスプリアスは減少し、また、ブリッジ付加容量 C_a により容易に減衰極を生成し、 C_a の増大は減衰極周波数をしゃ断周波数に近づけるため、形状比は向上するが減衰域での特性が劣化している。なお、変成比が（+1:1）の場合には全く減衰極が検出されなかった。

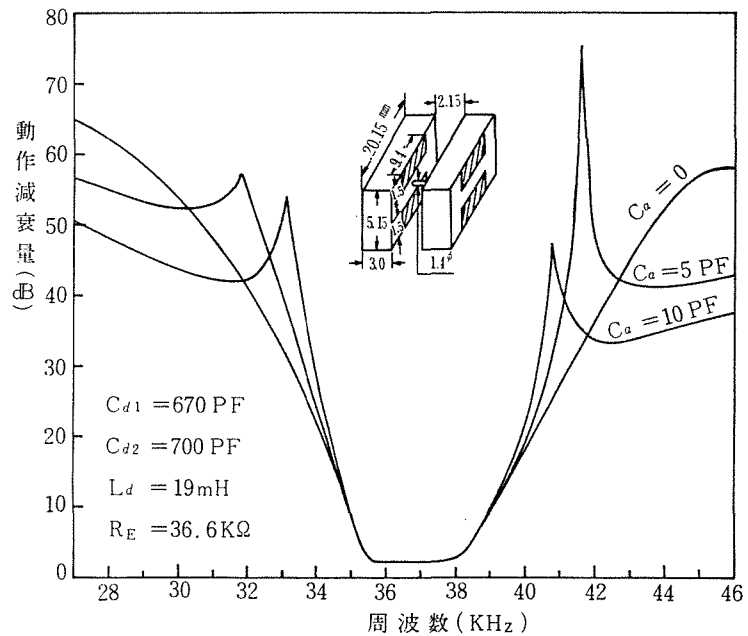
第14図および第17図でそう入損が大きいのは、結合子取り付けの不利や等価定数値の不一致にもとづくもので、工作技術の向上により改善できるものである。最近ホットエッチング技術が確立し、正確な電極分割が可能となっている。



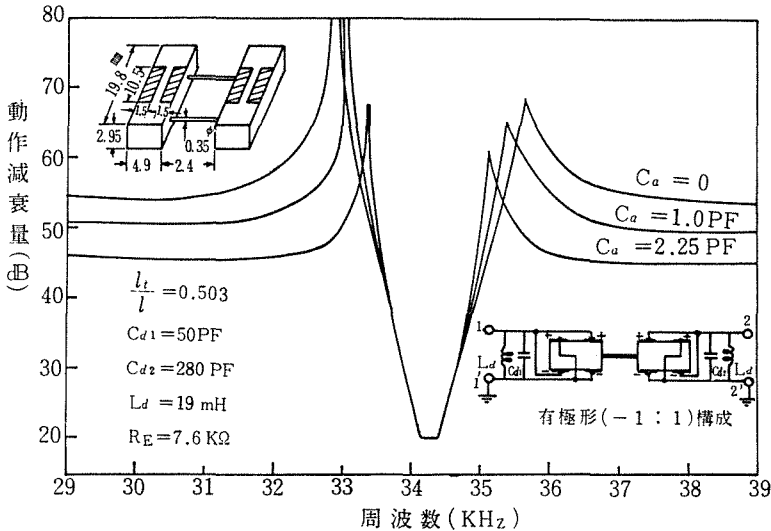
第14図 周波数特性（4.1節の横振動結合子形；部分電極）



第15図 広帯域にわたる周波数特性 (4.1節の横振動結合子形; 部分電極)



第16図 周波数特性 (4.1節の横振動結合子形; 部分電極)



第17図 周波数特性（4.2節の横振動結合子形；部分電極）

6. むすび

以上圧電共振子を機械的に結合したメカニカルフィルタの試作結果について報告した。均一な特性をもつ圧電共振子が得られなかったため、そう入損などの点で満足すべき特性が得られなかったが、圧電共振子を用いても、音片フィルタと同様、メカニカルフィルタが実現できることを明らかにした。また、出力端子の入れ換えによる理想変成器の極性反転も可能で、有極形および無極形の構成が簡単に実現できることも明らかとなった。

最近は材質が安定で、機械的にも強固なホットプレス焼成の圧電材料が開発されているので、これらの材料利用による特性改善がさらに期待できるであろう。

本文ではねじり結合子形および横振動結合子形のフィルタ構成についてだけのべたが、本構成の原理は縦振動結合子形のメカニカルフィルタにも適用される。

なお、本文の一部は日本音響学会講演会で発表した。⁽⁹⁾

文 献

- (1) W. P. Mason; 特許公告, 第159152号(昭18)
- (2) 日下部, 近野; 捩り結合子・横振動共振子形の電気・機械フィルタ, 信学誌, Vol. 47, No. 12(昭39—12)。
- (3) 近野, 和泉, 富川; たわみ結合子形横振動共振子メカニカルフィルタ, 日本音響学会講演論文集, 1—1—10(昭42—5)。
- (4) 近野, 中村, 日下部; 均一な横振動細棒の等価回路について, 日本音響学会講演論文集, 2—1—5(昭37—10)。
- (5) 抜山, 鈴木; M型圧電振動子の振動姿態とその電気音響定数, 信学誌, 231(昭17—6)
- (6) 日下部, 近野, 飯沢; 圧電振動子を機械的に結合したメカニカルフィルタ, 日本音響学会講演論文集, 1—1—6(昭44—5)。

Electromechanical Filter Composed of Transversely Vibrating Piezoelectric Resonators

Chiharu KUSAKABE* and Masashi KONNO**

*Section of Electricity, Faculty of Education

**Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering

This paper deals with construction methods and experimental results of electromechanical filters consisting of two rectangular piezoelectric resonators and one or two couplers. The resonators vibrate transversely and are coupled with torsionally or transversely vibrating couplers.

First, construction of the piezoelectric resonator is described. The resonator is a rectangular plate made from lead zirconate and lead titanate ceramics.

Metal-plating electrodes formed on both surfaces of the rectangular piezoelectric plate are split into two parts and the diagonal opposite electrodes among them are connected with each other electrically.

When an *ac* voltage is applied between the electrical terminals, the upper part of the plate is lengthened and the lower one is contracted. Thus, the first and the third modes of transverse vibration are excited in the resonator.

Secondly, three design methods of the mechanical filter are described. By exchanging the connection of out put terminals, two kinds of construction of the mechanical filter are obtained; one is of attenuation poles, and the other has none of attenuation poles.

Lastly, some experimental results of the mechanical filters suppressing higher harmonics are described.